

УДК 614.8

Р. Г. Мелещенко, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5411-2030)
Національний університет громадянської захисти України, Харків, Україна

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕМ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА

Разработан метод предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры по данным контроля концентрации загрязнений окружающего атмосферного воздуха. Новый научный результат состоит в использовании рекуррентных диаграмм и меры рекуррентности состояний для концентраций загрязнений атмосферы в реальном времени наблюдения. Отличительной особенностью является использование нижней треугольной формы рекуррентных графиков и меры рекуррентности состояний, являющейся усреднением текущих значений в динамическом окне нарастающей ширины в реальном времени наблюдения. Метод позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые чрезвычайные события на объектах критической инфраструктуры. В качестве опасного загрязнителя рассматривался формальдегид, характерный для большинства объектов критической инфраструктуры. Установлено, что динамика концентрации формальдегида в воздухе имеет хаотическую структуру. Хаотическая структура характеризуется периодической и экстремальной топологиями с резкой их сменой. Показано, что чрезвычайной ситуации или опасному событию на объекте предует высокое значение меры, которое резко снижалось до нуля или близкого к нему значения. После этого имело место резкое возрастание меры. Отмечается, что возможное возникновение чрезвычайной ситуации или других нарушений технологических процессов, связано с резким переходом от рекуррентности состояний концентрации загрязнения атмосферы к ее отсутствию с последующим восстановлением прежней рекуррентности состояний. Показано, что такое поведение рекуррентности можно использовать в качестве локальных предвестников опасных событий. Наличие высоких значений меры рекуррентности состояния загрязнений атмосферы в моменты, предшествующие их максимальной концентрации, позволяют прогнозировать и предотвращать возникновение чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры путем принятия оперативных управленческих решений.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, опасное загрязнение, рекуррентный график, мера рекуррентности, рекуррентность состояний

1. Введение

Одним из направлений государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) на объектах критической инфраструктуры является подготовка, и реализация мер, направленных на предотвращение ЧС (предупреждение и уменьшение масштабов ЧС). Издавна считалось, что гораздо важнее предотвратить беду, чем потом бороться с ее последствиями. Зарубежный опыт и отечественная практика показывают, что затраты на проекты по предотвращению ЧС значительно ниже возможного ущерба. Предотвращение ЧС обеспечивается заблаговременным, а иногда и оперативным проведением комплекса мероприятий (превентивных мер), направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения ЧС, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба, нанесенного окружающей природной среде, и материальных потерь в случае их возникновения. Предотвращение обычно имеет в виду, во-первых, предупреждение возникновения ЧС (снижение риска возникновения), а во-вторых, – уменьшение возможных масштабов ЧС (минимизация возможных потерь и ущерба). Основным мероприятием по предотвращению ЧС на объектах критической инфраструктуры является своевременное выявление угроз с целью

принятия оперативных управленческих решений. Однако интенсивное развитие критической инфраструктуры (объектов энергетики, промышленности и транспорта) неизбежно связано с увеличением количества вредных и опасных веществ, выбрасываемых в окружающую атмосферу. По данным многолетнего мониторинга, количество выбрасываемых в атмосферу вредных химических соединений и веществ удваивается каждые 12-14 лет. В связи с этим проблема предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры, связанная с выбросами вредных веществ, загрязняющих атмосферу, относится к одной из актуальных глобальных проблем современности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известно, что большинство объектов критической инфраструктуры загрязняют множеством различных опасных веществ окружающую атмосферу, а также примыкающие территории. Происходит это из-за несовершенства оборудования, систем, эксплуатации, а также в результате аварий или ЧС. Интенсивность загрязнения атмосферы вредными веществами зависит от их концентрации, состояния атмосферы, числа источников и других факторов. В условиях ЧС на объектах критической инфраструктуры концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, существенно возрастают.

Газообразные загрязнения объектов критической инфраструктуры содержат десятки тысяч химических веществ, соединений и элементов, более двухсот из которых являются высокотоксичными и ядовитыми, которые могут приводить к немедленной смерти или тяжелым и опасным заболеваниям персонала и населения. Наибольший ущерб атмосфере и окружающей природной среде наносят такие вещества, как оксиды азота и углерода, альдегиды, формальдегиды, бензопирен и другие ароматические соединения, которые относятся к отравляющим веществам [1].

Процессы воздействия загрязнений на атмосферу в силу их сложности, не могут быть описаны и смоделированы с достаточной точностью. Однако их можно изучать и описывать на основе наблюдений. Современная загрязненная атмосфера представляет собой сложную динамическую систему, демонстрирующую диссипативность структуры, нелинейную динамику, а также элементы самоорганизации и хаоса. В таких системах традиционные методы не могут обнаруживать имеющиеся связи между элементами, поскольку базируются на линейности их взаимодействия, которое обычно нарушается [2]. Однако представление сложной динамики состояний загрязнений атмосферы имеет первостепенное значение для предотвращения ЧС, управления и недопущения опасных ее состояний [3]. В этой связи методы нелинейной динамики оценки состояния сложных систем при наличии шумов, нестационарности и коротких рядах данных наблюдения в настоящее время являются активной областью исследований во многих дисциплинах [4]. Для исследования динамики состояния различных систем находят применение нелинейные методы корреляционной размерности, Ляпунова, энтропии и др. Однако данные методы основываются на наличии достаточно длинных реализаций наблюдаемых данных. Поэтому их непосредственное применение в случае коротких рядов данных наблюдения, часто приводит к некорректным результатам [5]. Для корректного решения проблемы предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры на основе контроля состояния загрязнений атмосферного воздуха целесообразно

использовать нелинейные подходы, которые не зависят от заданных статистических распределений данных и применимы для коротких, а также динамических выборок данных, обычно маскируемых естественными шумами, переходными процессами и различными артефактами. Сегодня лишь анализ, основанный на рекуррентном поведении состояний экосистем, соответствует отмеченным выше требованиям [6].

Рекуррентное поведение состояний сложных систем обычно принято отображать в виде соответствующих рекуррентных диаграмм (RP) [7]. Методы RP – это методы анализа данных, основанные на визуализации траекторий динамических систем в соответствующем фазовом пространстве [5]. Методы RP позволяют судить о характере протекающих в сложной динамической системе процессов с учетом наличия и влияния шумов, дрейфа, рекуррентности (замираний) состояний, экстремальных событий, скрытой периодичности, цикличности и других факторов. Количественный анализ RP позволяет сопоставить диаграмме некоторые численные меры, основанные на плотности рекуррентности точек. Однако в связи с отсутствием до настоящего времени удовлетворительной теории количественных мер RP и их применения, данный подход нуждается в дополнительных исследованиях, связанных особенностями решения проблемы предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры на основе анализа состояния загрязнений атмосферного воздуха [3].

Вместе с тем, известны приложения методов теории динамических систем к анализу различных типов геофизических систем [8, 9]. В теории динамических систем разработаны методы, позволяющие по одномерным данным наблюдений фиксированной длины восстанавливать состояние всей изучаемой системы. В частности, анализу временных рядов в геофизике посвящено немало работ, в том числе с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [9, 10]. Понимание принципов и механизмов, лежащих в основе динамики опасных состояний загрязнений атмосферы, тесно связано с прогрессом в области методов анализа сложных систем. Понятия, возникшие в области нелинейной динамики, такие как корреляционная размерность [11] или показатели Ляпунова [12], успешно используются для количественного анализа топологии фазового пространства и динамических свойств различных систем. Так, например, при изучении топологии используются фрактальные свойства [13, 14], информационные меры [15] и другие типы мер. Сегодня особое внимание уделяется изучению динамики сложных систем на основе мер рекуррентности состояний (РС) [7]. Отмечается, что свойство РС характерно для большинства реальных динамических сложных систем и процессов вне зависимости от их природы.

Таким образом, RP являются одним из конструктивных нелинейных методов изучения динамики и выявления ее особенностей на основе временных рядов реальных наблюдений [7]. В сочетании с методами количественного анализа РС удастся выявлять структурные особенности топологий динамики состояний сложных систем, которые не могут быть выявлены классическими методами [16]. Анализ РС рассматриваемых атмосферных загрязнений может быть выполнен на основе мер рекуррентности. Однако известные меры РС динамических систем остаются достаточно сложными и не в полной мере подходят для конструктивного решения рассматриваемой проблемы предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры. Объясняется это ограниченными возможностями использования RP и мер РС в динамических условиях, связанных

с поступлением данных в реальном времени наблюдения. Поэтому важной и нерешенной частью проблемы предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры на основе РС состояний загрязнений атмосферного воздуха является разработка метода применения рекуррентных диаграмм и меры рекуррентности состояний для загрязнений окружающей атмосферы в реальном времени наблюдения данных.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование возможности предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры с помощью контроля рекуррентности состояний загрязнений окружающей атмосферы.

Для достижения цели работы были поставлены задачи:

- разработать метод предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры на основе применения рекуррентных диаграмм и соответствующей меры рекуррентности состояний для загрязнений окружающей атмосферы в реальном времени наблюдения;
- разработать методику экспериментальных исследований;
- проверить работоспособность предложенного метода предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры на примере использования экспериментальных данных загрязнения атмосферного воздуха формальдегидом.

4. Разработка метод предотвращения чрезвычайных ситуаций на основе контроля рекуррентности состояний загрязнений воздуха

Следуя [17], показано, что реальная динамика концентрации атмосферных загрязнений (двуокиси азота) характеризуется хаотическим поведением. Наиболее заманчивым приложением теории нелинейных систем с хаотическим поведением является прогнозирование динамики порождаемых ими временных рядов. Наблюдаемые данные обычно представляют соответствующий временной ряд. Например, для загрязнений атмосферы в качестве наблюдаемых данных могут выступать изменения концентрации одного или нескольких загрязнений. Если такие наблюдаемые данные определенным образом обработать, то при некоторых условиях возможно с большой точностью произвести оценку будущего значения временного ряда, зная только предыдущие значения. При этом оказывается, что методы теории вероятностей зачастую работают несколько хуже, чем методы теории динамических систем. Если система проявляет хаотические свойства, то это соответствует наличию в ее фазовом пространстве более сложного, чем цикл, образования – странного (хаотического) аттрактора. Странный аттрактор представляет собой множество очень сложной геометрии, к которому притягиваются проходящие вблизи траектории. Данное понятие впервые было введено в работе Д. Рюэля и Ф. Такенса «О природе турбулентности» еще в 1971 году.

Для реализации метода предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры на основе принципов нелинейной динамики необходимо применение рекуррентных диаграмм и меры РС концентрации загрязнений окружающей атмосферы в реальном времени наблюдения данных. Под состоянием атмосферных загрязнений в

соответствующем фазовом пространстве будем понимать наблюдаемые непосредственно или ненаблюдаемые непосредственно, но восстановленные по одному наблюдаемому ряду данных [18], анализируемые переменные состояния. На практике данные о возмущениях обычно отсутствуют. Единственной доступной информацией при этом являются реальные наблюдения (измерения) состояния концентраций загрязнений атмосферы. Пусть регистрация наблюдений осуществляется в дискретные моменты времени. Тогда указанная информация в произвольный дискретный момент времени i может быть представлена m -мерным вектором данных текущих концентраций загрязнений атмосферы

$$\bar{z}_i = \bar{d}_i + \bar{\Delta}_i, i = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1, \quad (1)$$

где \bar{d}_i – вектор истинных, но не известных, текущих концентраций загрязнений атмосферы; $\bar{\Delta}_i$ – вектор неизвестных текущих возмущений; N_s – максимальное число регистрируемых данных (длина выборки дискретных данных – длина временного ряда).

В рассматриваемом случае при фиксированном и конечном значении N_s применение метода RP [7] позволяет отображать траектории (1) в m -мерном фазовом пространстве на двумерную двоичную матрицу размером $N_s \times N_s$. При этом единичный элемент полученной матрицы при некоторых моментах i и j будет соответствовать РС концентрации загрязнений (1). Координатные оси RP в этом случае будут определяться осями дискретного времени наблюдения. Следуя [16], сказанное выше можно представить, соотношением

$$R^{m, \varepsilon}_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|\bar{z}_i - \bar{z}_j\|), \bar{z}_i \in \Omega^m, i, j = 1, 2, \dots, N_s, \quad (2)$$

где $\Theta(*)$ – функция Хевисайда; ε – размер окрестности состояния \bar{z}_i в момент времени i , а $\|*\|$ – знак определения нормы. В рассматриваемом случае предотвращения ЧС на объектах критической инфраструктуры на основе представления (2) требуется вычислять текущую матрицу $R^{m, \varepsilon}_{i,j}$ для каждого момента i в реальном темпе времени наблюдения. Это означает, что величина N_s не фиксируется, а принимает значения 1, 2, 3... и т.д. Поскольку матрица $R^{m, \varepsilon}_{i,j}$ является симметричной относительно диагонали $i = j$, в рассматриваемом случае вместо (2) можно ограничиться нижней треугольной частью матрицы, определяемой

$$RM^{m, \varepsilon}_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|\bar{z}_i - \bar{z}_j\|), \text{ при } \bar{z}_i \in \Omega^m, i \neq j, i \geq j, i, j = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Изучение динамики состояний различных сложных систем на основе (2) стало востребованным благодаря методам количественного анализа РС [7]. Однако, существующие меры обладают недостаточной оперативностью и оказываются недостаточно чувствительными к особенностям динамики состояний, что ограничивает их применение для решения таких задач как предотвращение ЧС на объектах критической инфраструктуры по атмосферным загрязнениям.

Наиболее известной и распространенной является мера РС, определяемая на основе (2), величиной

$$R_0(\varepsilon) = \frac{1}{N_s^2} \sum_{i \neq j}^{N_s} R^{m, \varepsilon}_{i,j}. \quad (4)$$

Мера (4) определяет плотность точек РС в RP (2), подсчитывая их без учета линии идентичности $i = j$. Если величина $N_s \rightarrow \infty$, мера (4) определяет вероятность РС для исследуемой динамической системы. Основным ограничением данной меры является то, что она определяет вероятность РС интегрально для всей выборки наблюдений заданной длины N_s . Это означает, что мера (4) не позволяет оценивать РС для каждого момента времени. В связи с этим ее невозможно использовать для локализации во времени РС. Поэтому в работе [17] впервые предложено вместо (4) с учетом представления (3) использовать модифицированную меру РС, определяемую функционалом от величины ε и текущего момента времени i , следующего вида

$$M_1(\varepsilon, i) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R M^{m, \varepsilon}_{i,k}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Модификация (5) меры (4) позволяет определять динамическую плотность точек РС для текущего момента времени i с учетом размера ε окрестности для наблюдаемых состояний \bar{z}_i . Поэтому на основе меры (5) возможно оценивать и контролировать в реальном времени наблюдения динамику вероятности РС исследуемой динамической системы. Это означает, что мера (5) в отличие от известных мер позволяет отслеживать локальную вероятность РС для каждого момента наблюдений и по величине вероятности РС осуществлять прогноз о последующих тенденциях изменения концентрации загрязнений в атмосферном воздухе вблизи объектов критической инфраструктуры с целью предотвращения возможных ЧС. При этом следует иметь в виду, что мера (5) при увеличении времени i наблюдения дает более точную оценку локальной вероятности РС. Однако на начальном этапе точность оценки локальной вероятности РС оказывается низкой в силу ограниченности выборки наблюдений. Локальная вероятность РС в общем случае численно характеризует степень повторяемости различных состояний для текущего момента времени наблюдений. По величине РС (5) возможно судить о ламинарных состояниях (отсутствии или незначительном рассеивании загрязнений атмосферы) – характерных индикаторах возможных опасных концентраций атмосферных загрязнений. Выявляя такие состояния в динамике атмосферных загрязнений можно прогнозировать увеличение концентраций контролируемых атмосферных загрязнений и предотвращать возникновение ЧС путем принятия адекватных управленческих решений.

Таким образом, предлагаемый метод предотвращения чрезвычайных ситуаций, базирующийся на применении RP и меры РС для загрязнений атмосферы объектами критической инфраструктуры, основывается на вычислении меры РС (5) с учетом модифицированного представления RP (3). Затем, по значениям вычисляемой для каждого момента наблюдения меры РС (5) оценивается текущая вероятность ламинарных состояний атмосферных загрязнений и на ее основе производится прогноз, предупреждающий о

возможном возникновении ЧС. По результатам такого прогноза выявляются нештатные ситуации (аварии), а также принимаются решения о своевременном реагировании на них.

5. Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки работоспособности предложенного метода предотвращения чрезвычайных ситуаций, базирующийся на применении РР и меры РС для загрязнений атмосферы объектами критической инфраструктуры. Известно, что формальдегид является токсичным газом, негативно воздействующим на центральную нервную систему, генетический материал, кожный покров, репродуктивные органы и т.д. Поэтому в качестве исследуемого опасного загрязнителя атмосферного воздуха для типовой городской конфигурации с размещенными объектами критической инфраструктуры рассматривался формальдегид (CH_2O). Предельно допустимая максимальная разовая концентрация формальдегида в атмосферном воздухе составляет $0,035 \text{ мг/м}^3$, а предельно допустимая средняя суточная концентрация (ПДК) составляет $0,003 \text{ мг/м}^3$. Формальдегид входит в список канцерогенных веществ.

В качестве типовой рассматривалась городская конфигурация со средним уровнем индекса загрязненности атмосферы порядка 6,8 ед. Указанный индекс загрязненности атмосферы характерен для большинства современных городов мира со средней насыщенностью различными типами характерных объектов критической инфраструктуры.

Измерение концентрации формальдегида в атмосферном воздухе выполнялись с помощью портативного газоанализатора DRÄGER PAC 7000 (Германия). Данный газоанализатор обеспечивает требуемую надежность и точность результатов измерения концентрации формальдегида в атмосферном воздухе. Концентрации CH_2O измерялись в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов». Измерения проводились в течение одного месяца (31 день) в одном и том же месте контроля. Координаты места измерения определялись с помощью системы GPS и соответствовали 49.421643 и 32.021621. Концентрации CH_2O измерялась в мг/м^3 . Измерения концентрации CH_2O производились 4 раза в сутки (01:00, 07:00, 13:00, 19:00 часов). Для удобства обработки результатов измерений начальному дискретному моменту $i=0$ времени измерения соответствовало реальное время 01:00 часов первого дня эксперимента. При этом дискретному моменту измерения $i=120$ соответствовало время 01:00 часов 31-го дня эксперимента.

6. Результаты экспериментальной проверки метода предотвращения чрезвычайных ситуаций на примере загрязнения воздуха формальдегидом

В качестве базового интервала для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры выбирался некий ограниченный интервал времени, определяемый с 01:00 часов 4-го дня ($i=12$) по 01:00 часов 13-го дня ($i=48$) эксперимента. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены рекуррентные графики (3) в виде соответствующих кластеров черных и белых точек для измеренных концентраций CH_2O в атмосферном воздухе (рис. 1) для двух заданных размеров окрестности $\varepsilon=0,0025$ и $\varepsilon=0,0015$.

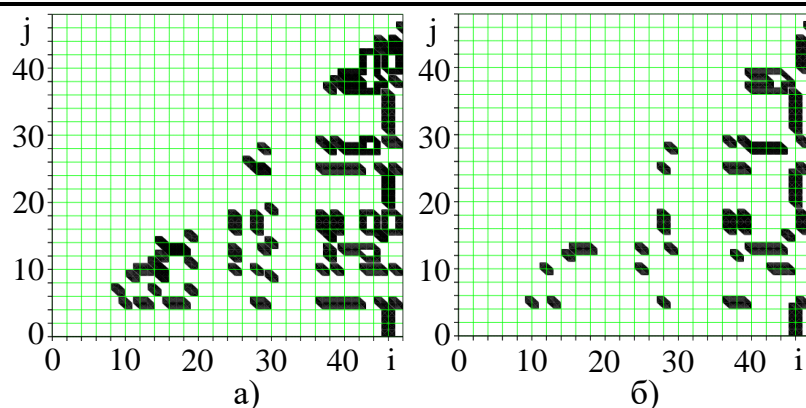


Рис. 1. Рекуррентные графики (3) для измеренной концентрации (мг/м^3) CH_2O в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации при различных значениях размера окрестности: а) – $\varepsilon=0,0025$; б) – $\varepsilon=0,0015$

Динамика меры $M_1 = M_1(\varepsilon, i)$ РС для концентрации CH_2O в атмосферном воздухе для трех заданных размеров окрестности $\varepsilon=0,0015$, $\varepsilon=0,0025$ и $\varepsilon=0,008$ иллюстрируется на рис. 2.

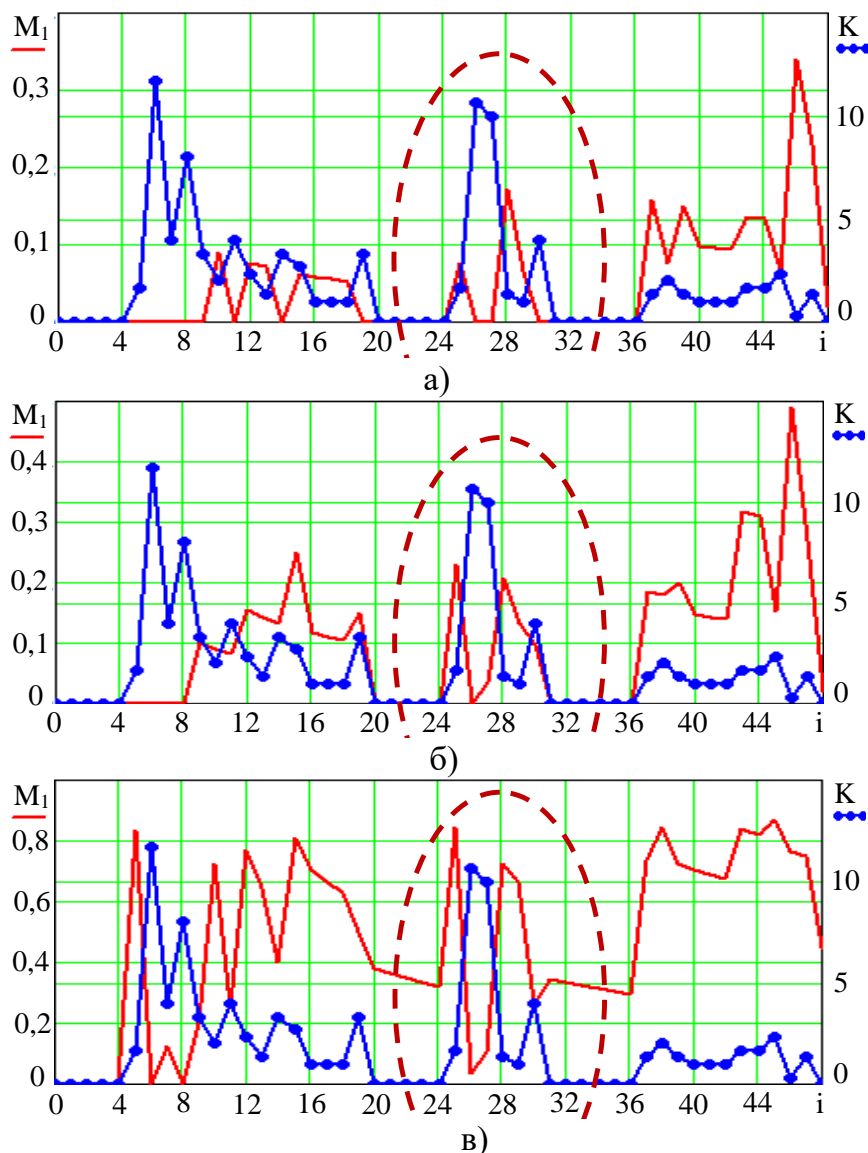


Рис. 2. Динамика меры M_1 РС для концентрации CH_2O в атмосферном воздухе при различных размерах окрестности: а – $\varepsilon=0,0015$; б – $\varepsilon=0,0025$; в – $\varepsilon=0,008$

Для сравнения представлена динамика измеренной нормированной относительно ПДК концентрации CH_2O в течение базового интервала времени наблюдения (рис. 2). При этом маркеры соответствуют моментам измерения концентрации CH_2O , а выделенная область (штриховая линия на рис. 2) характеризует опасный уровень загрязнения CH_2O атмосферного воздуха (свыше 10 ПДК), обуславливаемый выбросами и атмосферными условиями на интервале между 23 и 32 измерениями.

На рис. 3 приведены зависимости меры РС M_1 от размера окрестности ε для моментов 24, 25, 26 и 28 измерений концентрации CH_2O в атмосферном воздухе. Там же вертикальными пунктирными линиями отмечены фиксированные значения размера окрестности ε , равные 0,0015 и 0,008, соответствующие рис. 2 а), в).

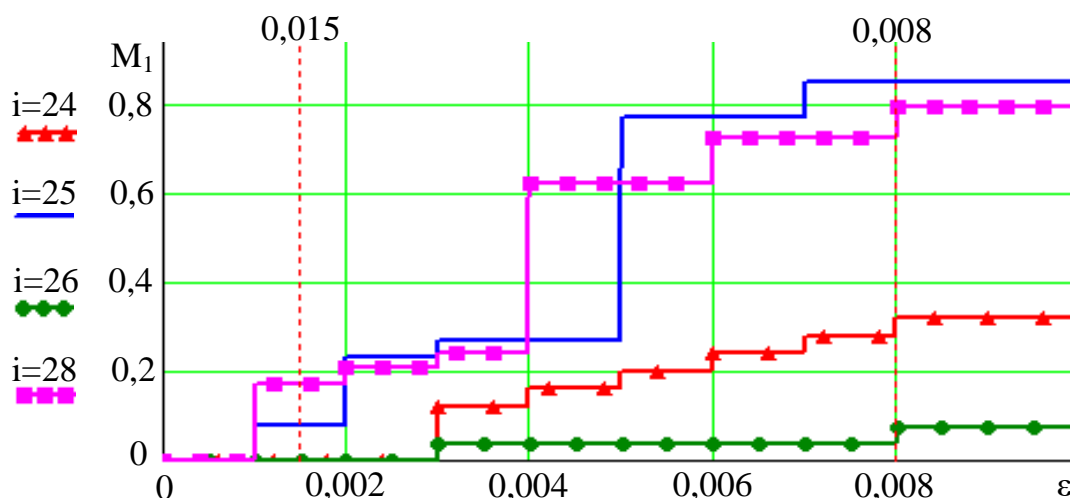


Рис. 3. Зависимости меры M_1 от размера окрестности ε для различных моментов измерения i

Выше отмечалось, что мера M_1 характеризует текущую вероятность РС концентраций CH_2O в атмосферном воздухе. Поэтому зависимости на рис. 3, по сути, иллюстрируют текущую вероятность РС концентраций загрязнения для фиксированных моментов измерений в зависимости от размера окрестности ε РС.

7. Обсуждение результатов экспериментальной проверки метода предотвращения чрезвычайных ситуаций на примере загрязнения воздуха формальдегидом

Анализ RP на рис. 1 показывает, что динамика состояния концентрации CH_2O в атмосферном воздухе оказывается не случайной, а хаотической. Это подтверждает справедливость выводов [17]. При этом хаотическая динамика концентрации CH_2O в атмосферном воздухе является неодинаковой. Она характеризуется различной топологией и текстурой RP. Прежде всего, для нее характерны элементы периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями динамики. Вид RP позволяет выявлять моменты экстремальных и редких событий, связанных с опасной загрязненностью атмосферы. Кроме этого удастся выявлять мелкомасштабные структуры, составленные из точек, диагональных, горизонтальных и вертикальных линий (рис. 1). Комбинации вертикальных и горизонтальных линий формируют прямоугольные кластеры рекуррентных точек. Вертикальные и горизонтальные линии, определяемые (3) на

рис. 1, выделяют промежутки времени, в которых концентрация CH_2O в атмосферном воздухе не изменяется или изменяется незначительно (концентрация CH_2O как бы «замораживается» в эти промежутки времени). Это является типичным поведением при ламинарных состояниях в атмосфере. В указанных состояниях отсутствует перемешивание между соседними слоями атмосферного воздуха и соответственно замедляется или вообще отсутствует рассеивание загрязнителя, что приводит к сохранению или накоплению концентрации загрязнителя. Такие состояния могут использоваться в качестве индикаторов возможных скрытых опасных загрязнений атмосферы. При этом наличие нерегулярных черных и белых кластеров РР (рис. 1) свидетельствует о нерегулярности динамики концентрации загрязнения атмосферы, которая может быть, обусловлена, например, наличием корреляций. Анализ динамики меры M_1 РС для концентрации CH_2O в атмосферном воздухе в месте контроля (рис. 2) в течение базового интервала наблюдения свидетельствует о ее неравномерности. Так, максимальная величина меры изменяется в интервале от 0,35 до 0,8. При этом следует заметить, что максимальные значения меры в течение базового интервала наблюдения зависят от размера окрестности ε . С увеличением размера окрестности возрастают максимальные значения меры. Однако характер динамики изменения меры в течение базового интервала остается схожим. Важным является характер динамики меры в интервале 23–32 отсчет (на рис. 2 указанная область выделена штриховой линией). Подобный характер динамики меры характерен и для других интервалов, принадлежащих базовому интервалу наблюдения (рис. 2). При этом максимуму концентраций CH_2O в атмосферном воздухе в пункте контроля соответствуют минимумы значений меры M_1 (близкие к нулевым). Поэтому нулевые значения меры могут рассматриваться в качестве индикаторов возможных ЧС или других нарушений технологических процессов на объектах критической инфраструктуры, связанных с выбросами опасных веществ в атмосферу. Более подробный анализ динамики меры РС на рис. 2 показал, что перед началом ЧС или опасного состояния (28 отсчет) имело место высокое значение РС, которое резко уменьшалось в момент 28 отсчета до нуля или близкого к нулю значения. После этого имело место резкое увеличение величины меры. Возможное появление ЧС, связано резким переходом от рекуррентности состояний концентрации загрязнения атмосферы к ее потере с последующим восстановлением прежней рекуррентности состояний. При этом моменты времени появления высоких значений меры РС для концентрации загрязнений атмосферного воздуха в районе объектов критической инфраструктуры можно рассматривать в качестве предвестников возникновения на объектах ЧС или других нарушений технологических процессов, связанных с опасными выбросами в атмосферу. Наличие высоких значений меры РС загрязнений атмосферы в моменты, предшествующие их максимальной концентрации, позволяют предотвращать возможное возникновение ЧС на объектах критической инфраструктуры путем принятия адекватных управленческих решений. Зависимости меры РС M_1 от размера окрестности ε для различных моментов измерения на рис. 3 показывают, что наиболее предпочтительными с точки зрения выявления предвестников ЧС на объектах критической инфраструктуры являются размеры окрестности ε , принадлежащие интервалу от 0,0015 до 0,008 (от 0,5 ПДК до 2,7 ПДК для формальдегида).

8. Выводы

1. Разработан метод предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры по данным контроля концентрации загрязнений окружающего эти объекты атмосферного воздуха. Новый научный результат состоит в использовании для этой цели рекуррентных диаграмм и соответствующей меры рекуррентности состояний для концентраций загрязнений атмосферы в реальном времени наблюдения. Отличительной особенностью является использование нижней треугольной формы рекуррентных графиков и применения меры рекуррентности состояний на основе усреднения текущих значений рекуррентности в динамическом окне, ширина которого нарастает в реальном времени наблюдения. Метод позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры и повышать тем самым эффективность мероприятий по их недопущению и защите населения и окружающей среды.

2. Разработана методика экспериментальных исследований для проверки работоспособности предложенного метода на примере измерения реальных концентраций атмосферных загрязнений в пункте контроля типовой городской конфигурации для среднего уровня индекса загрязненности атмосферы. Методика экспериментальных исследований базируется на использовании современного портативного газоанализатора типа DRÄGER PAC 7000 (Германия). В качестве опасного загрязнителя в эксперименте рассматривался формальдегид, характерный для большинства объектов критической инфраструктуры. Измерения в пунктах контроля производились 4 раза в сутки (01:00, 07:00, 13:00, 19:00). Измерения проводились в течение одного месяца (31 день). При этом для проверки метода выбирался более короткий базовый временной интервал.

3. В ходе экспериментальной проверки предложенного метода на примере загрязненности атмосферного воздуха формальдегидом в типовой городской конфигурации установлено, что динамика его концентрации в воздухе в течение исследуемого интервала имеет хаотическую структуру. Структура характеризуется периодической и экстремальной топологиями с резкой сменой динамики. Установлено, что перед началом чрезвычайной ситуации или опасного события на объекте (28 отсчет) имело место высокое значение меры рекуррентности состояний, которое резко снижалось в момент 28 отсчета до нуля или близкого к нему значения. После этого имело место резкое возрастание величины меры. Отмечается, что возможное появление чрезвычайной ситуации или других нарушений технологических процессов, связано с резким переходом от рекуррентности состояний концентрации загрязнения атмосферы к ее отсутствию с последующим восстановлением прежней рекуррентности состояний. Показано, что такие моменты времени можно рассматривать в качестве предвестников возникновения чрезвычайных ситуаций или иных опасных событий на объектах. Наличие высоких значений меры рекуррентности состояний загрязнений атмосферы в моменты, предшествующие их максимальной концентрации, позволяют предотвращать возникновение возможных чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры путем принятия адекватных управленческих решений. Установлено, что наиболее предпочтительными с точки зрения выявления предвестников чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры являются размеры окрестности ε для концентраций формальдегида от 0,5 ПДК до 2,7 ПДК.

Литература

1. Первый независимый экологический портал: [Электронный ресурс]. К. 2009–2016. Режим доступа: <http://environments.land-ecology.com.ua/septik/1575-sostoyanie-atmosfery-ukraina-detalnyj-obzor.html>
2. Pascual M., Ellner S. P. Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models // *Ecology*. 2000. V. 81(10). P. 2767–2780.
3. Parrott L. Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis // *Ecological Complexity*. 2004. V. 1(2). P. 111–125.
4. Proulx R. Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: a field ecologist's perspective // *Ecological complexity*. 2007. V. 4. P. 85–92.
5. Kantz H., Schreiber T. Nonlinear time series analysis // Cambridge University Press. 2003. 365p.
6. Marwan, N., Schinkel, S., Kurths, J., Recurrence Plots 25 Years Later – Gaining Confidence In Dynamical Transitions, *EPL* 101 (2013) 20007.
7. Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences. 2005. 26 p.
8. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 3(93). № 9. P. 34–40.
9. Poulsen A., Jomaas G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings // *Fire Technology*. 2012. №48. P. 419–439.
10. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of gaseous medium at the early ignition of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 5(95). № 9. P. 34–40.
11. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // *Physica*. 1983. № 9. P. 189–208.
12. Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L., Vastano J. A. Determining Lyapunov exponents from a time series // *Physica*. 1985. №16. P. 285–317.
13. Marwan N., Kurths J., Saperin P. Generalised recurrence plot analysis for spatial data // *Phys. Lett.* 2007. № 360. P. 545–551.
14. Dombrradi E., Timarr G., Bada G., Cloetingh S., Horvrath F. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system // *Global and Planetary Change*. 2007. № 58. P. 197–213.
15. Schirdewan A., Gapelyuk A., Fischer R., Koch L., Schütt H., Zacharzowsky U., Dietz R., Thierfelder L., Wessel N. Cardiac magnetic field map topology quantified by Kullback-Leibler entropy identifies patients with hypertrophic cardiomyopathy // *Chaos*. 2007. V. 17. № 1. P. 015118.
16. Mandelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* // Institut kompyuternyih issledovaniy. 2002. V. 656. P. 12.
17. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. V. 1(97). № 10. P. 34–40.
18. Packard N. H., Crutchfield J. P., Farmer J. D., Shaw R. S. Geometry from a time series // *Phys. Rev. Lett.* 1980. № 45. P. 712–716.

*Р. Г. Мелещенко, к.т.н., доц. каф.**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ШЛЯХОМ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Розроблено метод запобігання надзвичайним ситуаціям на об'єктах критичної інфраструктури за даними контролю концентрації забруднень оточуючого атмосферного повітря. Новий науковий результат полягає в використанні рекурентних діаграм і мір рекурентності станів для концентрацій забруднень атмосфери в реальному часі спостереження. Відмінною особливістю є використання нижньої трикутної форми рекурентних графіків і мір рекурентності станів, що є усередненням поточних значень в динамічному вікні наростаючої ширини в реальному часі спостереження. Метод дозволяє оперативно виявляти не тільки явні, але і приховані надзвичайні події на об'єктах критичної інфраструктури. В якості небезпечного забруднювача розглядався формальдегід, характерний для більшості об'єктів критичної інфраструктури. Встановлено, що динаміка концентрації формальдегіду в повітрі має хаотичну структуру. Хаотична структура характеризується періодичною і екстремальною топологіями з різкою їх зміною. Показано, що надзвичайній ситуації чи небезпечній події на об'єкті передують високі значення міри, яке різко знижувалось до нуля або близького до нього значення. Після цього можна говорити про різке зростання міри. Відзначається, що можливе виникнення надзвичайної ситуації або інших порушень технологічних процесів, пов'язане з різким переходом від рекурентності станів концентрації забруднення атмосфери до її відсутності з подальшим відновленням колишньої рекурентності станів. Показано, що таку поведінку рекурентності можна використовувати в якості локальних провісників небезпечних подій. Наявність високих значень міри рекурентності стану забруднень атмосфери в моменти, які передують їх максимальній концентрації, дозволяють прогнозувати і запобігати виникненню надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури шляхом прийняття оперативних управлінських рішень.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, небезпечне забруднення, рекурентний графік, міра рекурентності, рекурентність станів

*R. Meleschenko, PhD, Associate Professor of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS AT THE OBJECTS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE BY EARLY DIRECTION OF AIR POLLUTION

The method of preventing emergency situations on objects of critical infrastructure has been developed according to the data of the control of the pollution concentration in the surrounding atmospheric air. The new scientific result is the use of recurrent diagrams and measures of recurrence of states for air pollution concentrations in real time observation. A distinctive feature is the use of the bottom triangular form of recurrent graphs and measures of the recurrence of states, which is the averaging of the current values in the dynamic window of the increasing width in real-time observation. The methodology allows to detect not only explicit, but also hidden emergency events at objects of critical infrastructure. Formaldehyde, which is typical of most objects of critical infrastructure, was considered as a hazardous pollutant. It was established that the dynamics of formaldehyde concentration in air has a chaotic structure. Chaotic structure is characterized by periodic and extreme topologies with a sharp change in them. It is shown that an emergency or dangerous event on an object is preceded by a high value of the measure, which dropped sharply to zero or close to it. After that we can speak of a sharp increase in size. It is noted that the possible emergence of an emergency or other violations of technological processes is associated with a sharp transition from the recurrence of the states of concentration of atmospheric pollution to its absence, with the subsequent restoration of the former recurrence of states. It is shown that such behavior of recursion can be used as local predictors of dangerous events. The presence of high values of the degree of recovery of the state of atmospheric pollution at moments preceding their maximum concentration, allows you to predict and prevent the emergence of emergency situations on critical infrastructure objects through the adoption of operational management decisions.

Keywords: emergency situation, hazardous pollution, recurrence schedule, measure of recursion, recurrence of states

References

1. Pervyy nezavisimyy ekologicheskii portal: [Electronic resource]. K. 2009–2016. Access mode: <http://environments.land-ecology.com.ua/septik/1575-sostoyanie-atmosfery-ukraina-detalnyj-obzor.html>
2. Pascual, M., Ellner, S. P. (2000). Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models. *Ecology*, 81(10), 2767–2780.
3. Parrott, L. (2004). Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis. *Ecological Complexity*, 1(2), 111–125.
4. Proulx, R. (2007). Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: a field ecologist's perspective. *Ecological complexity*, 4, 85–92.
5. Kantz, H., Schreiber, T. (2003). *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, 365.
6. Marwan, N., Schinkel, S., Kurths, J., Recurrence Plots 25 Years Later – Gaining Confidence In Dynamical Transitions, *EPL* 101 (2013) 20007.
7. Webber, Jr. C. L., Zbilut, J. P. (2005). *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, 26.
8. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. (2018). Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/9(93), 34–40.
9. Poulsen, A., Jomaas, G. (2012). Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings. *Fire Technology*, 48, 419–439.
10. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of gaseous medium at the early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(95), 9, 34–40.
11. Grassberger, P., Procaccia, I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica*, 9, 189–208.
12. Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 16, 285–317.
13. Marwan, N., Kurths, J., Saperin, P. (2007). Generalised recurrence plot analysis for spatial data. *Phys. Lett.*, 360, 545–551.
14. Dombardi, E., Timarr, G., Bada G., Cloetingh, S., Horvath, F. (2007). Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system. *Global and Planetary Change*, 58, 197–213.
15. Schirdewan, A., Gapelyuk, A., Fischer, R., Koch, L., Schütt, H., Zacharzowsky, U., Dietz, R., Thierfelder, L., Wessel, N. (2007). Cardiac magnetic field map topology quantified by Kullback-Leibler entropy identifies patients with hypertrophic cardiomyopathy. *Chaos*, 17(1), 015118.
16. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody*. Institut kompyuternykh issledovaniy, 656, 12.
17. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(97), 29–35.
18. Packard, N. H., Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Shaw, R. S. (1980). Geometry from a time series. *Phys. Rev. Lett.*, 45, 712–716.

Надійшла до редколегії: 12.09.2018

Прийнята до друку: 13.11.2018